

盐渍区农田氮肥施用量对土壤硝态氮动态变化的影响

尹 飞^{1,2,3}, 毛任钊², 傅伯杰^{1*}, 杨萍果²

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085 ;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021 ; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 土壤硝态氮动态变化和残留与农田硝态氮淋溶以及地下水硝态氮污染密切相关。为了促进海河低平原盐渍区农田氮肥合理利用以及农业可持续发展, 试验在盐化潮土条件下, 通过设计不同施氮量 (0, 70, 140, 210 kg N hm⁻²) 处理, 重点研究了该区农田氮肥施用量对土壤硝态氮动态、残留以及土壤氮损失的影响。结果表明: (1) 0~100cm 土壤剖面硝态氮总量随施氮量显著增加, 施用氮肥没有改变剖面硝态氮总量随玉米生育进程波状变化趋势, 但明显增强了其变化幅度; (2) 施氮改变了硝态氮土壤剖面空间分布状态, 表现出施氮后上部土层 (0~40cm) 硝态氮比例显著增加而后迅速降低的趋势; (3) 硝态氮残留与氮素损失随施氮量增加而增加, 且 N210 和 N140 处理下氮素损失量显著高于 N70 和 N0。

关键词 硝态氮残留, 氮损失, 氮肥用量, 盐化潮土

文章编号: 1000-0933 (2007) 02-0596-07 中图分类号: S147.22, S154.4, S181 文献标识码: A

Efforts of nitrogen fertilizer application rate on nitrate dynamics in saline soil

YIN Fei^{1,2,3}, MAO Ren-Zhao², FU Bo-Jie^{1,*}, YANG Ping-Guo²

1 State Key Lab. of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China

2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS, Shijiazhuang 050021, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (2): 596~602.

Abstract The nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) is one of the main contaminants of ground water in areas of intensive agriculture around the world. And the dynamics and residue of soil NO₃⁻-N are related closely to NO₃⁻ leaching especially in intensive cultivated saline soils, where excessive water is usually irrigated in order to prevent salts accumulation in the root zone. To promote the reasonable using of nitrogen (N) fertilizer and agricultural sustainable development in saline soil, it is necessary to study the effects of N fertilizer application rates on soil NO₃⁻-N dynamics and residue in this area. So this field trial was conducted in saline fluvo-aquic soil in Nanpi County, Hebei Province, China between June 13-September 28, 2005. Plant used was maize (*Zea mays* L.). N fertilizer was applied at rates of 0, 70, 140, and 210 kg N hm⁻² as urea on July 14. There were 4 replicate plots of each treatment. For each plot, a soil sample was taken at each layer of soil, with total 6 layers from 0—100 cm. There were 9 sampling times throughout the growing season. When irrigating, eight water samples were collected every 10 minutes. Rainwater was also collected with 8 samples each rain time during the experimental period. All of the samples were stored under frozen condition. The NO₃⁻-N concentration in the soil and the

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2005CB121106), 国家自然科学基金资助项目 (40321101)

收稿日期: 2006-06-29; 修订日期: 2006-12-05

作者简介: 尹飞 (1978~), 男, 河南安阳人, 博士生, 主要从事景观生态学和农田生态系统可持续管理研究. E-mail: yinfei@265.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@rcees.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2005CB121106) and National Natural Science Foundation of China (No. 40321101)

Received date 2006-06-29; **Accepted date** 2006-12-05

Biography YIN Fei, Ph. D. candidate, mainly engaged in landscape ecology and farmland ecosystem sustainable management. E-mail: yinfei@265.com

ammonia and NO_3^- -N concentrations in water were analyzed using Flow Solution IV Analyzer (FSIV , O. I. Analytical , U. S. A.).

The results showed that the trend of the dynamic changes of total amount of NO_3^- -N in 0 — 100 cm soil profile along maize growth proceeding is a wave curve. And applying N fertilizer augmented the wavy extents. N fertilization significantly increased the total amount of NO_3^- -N in soil of each layers from 0 — 100 cm. There was a positive correlation between rates of N application and soil NO_3^- -N concentrations ($R=0.834^{**}$). The concentrations of NO_3^- -N in the topsoil (0 — 40cm) were relatively high within a short period after N application and decreased overtime because NO_3^- -N moved to the deep soil (40 — 100cm). Concentrations of NO_3^- -N in the lower layers of soil were higher at harvest only when N applied. High rates of N application ($>70\text{ kg N hm}^{-2}$) not only decreased grain yield of maize , but also significantly increased concentrations of NO_3^- -N in soil and resulted in the large amounts of N losing. The study demonstrated that applications of N significantly affected dynamics and residue of NO_3^- -N in this saline soil.

Key Words : nitrate residue ; nitrogen loss ; nitrogen application rate ; saline fluvo-aquic soil

氮肥在土壤中经过一系列的转化而形成硝态氮。硝态氮是一种有效性很广泛的养分^[1],它的化学性质决定了它易于随土壤水迁移而淋溶于地下水。所以长年过量的氮肥施用对环境安全是一潜在威胁,甚至在集约农业区已造成了地下水硝态氮污染^[2~9]。包括氮肥管理^[5]、灌溉管理^[10~12]、作物吸收氮素动态^[13]以及土壤氮素转化等在内的多种因素影响土壤硝态氮的运移淋溶。而土壤剖面中硝态氮的大量积累和自由水的存在则是硝态氮淋溶于下层土壤和地下水的前提条件^[14]。

南皮县地处华北海河流域。地质历史上的干旱气候和海水入侵造成该区咸水和盐化土的广泛分布。微咸水(盐分含量 $2\sim3\text{ g L}^{-1}$)和半咸水(盐分含量 $3\sim5\text{ g L}^{-1}$)占该县地下水资源的50.4%^[15]。为了避免盐分在作物根层(特别是上部土层)中积累,广泛采用大水漫灌(一次灌溉量可达 $90\sim130\text{ mm}$)方式进行灌溉,并且该区6~8月份降水量在400 mm左右。所以其土壤水分条件非常有利于硝态氮淋溶,在夏季尤为如此。因此,该区农田夏季硝态氮淋溶主要受土壤硝态氮含量影响。而南皮县氮肥过量施用的现象也相当普遍,年氮肥施用量已超过 400 kg N hm^{-2} ,其中有 $140\sim180\text{ kg N hm}^{-2}$ 用于秋季作物(主要是玉米)生产。如此大量的氮肥施用量对该区土壤中硝态氮含量到底有什么样的影响已成为非常迫切的问题。本试验的主要目的是:(1)评估盐化土条件下氮肥施用量对土壤硝态氮动态变化、作物氮素吸收以及相应土壤氮素损失的影响;(2)评估施氮对玉米产量的影响并确定该区玉米生产上适宜的氮肥施用量,为该区农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况和试验处理

试验于2005年在河北省南皮县中国科学院生态农业试验站进行。试验区属暖温带半干旱季风气候,年平均降水量550.0mm(74%分布在6~8月份),年平均蒸发量2138.6mm,年均气温 12.3°C 。历史上土壤总盐分含量较高,0~10cm超过0.8%,40cm以下基本稳定在0.5%左右^[16]。试验点0~20、20~60cm和60~100cm土壤中速效磷含量分别为 13.4 、 15.8 mg kg^{-1} 和 20.4 mg kg^{-1} ,速效钾含量分别为 175.4 、 202.6 mg kg^{-1} 和 179.5 mg kg^{-1} ,其它理化性质见表1。

夏玉米大田试验小区面积 120 m^2 ($15\text{ m}\times8\text{ m}$),供试玉米品种为蠡玉16,6月13日播种,9月28日收获,行距0.6m,株距0.25m。试验设4个氮肥处理:N0(0 kg N hm^{-2})、N70(70 kg N hm^{-2})、N140(140 kg N hm^{-2})和N210(210 kg N hm^{-2})。氮肥为尿素,于7月14日以追肥方式进行沟施,4次重复。播种前灌溉100mm水量,在玉米生育期内不再进行灌溉。

1.2 样品采集与处理

分别于播种前(6月12日)、施肥前(7月11日)、施肥后7d到57d(7月21日到9月9日)之间每隔10d

以及成熟期(9月28日)进行采样。土壤样品分层采集,即按0~10cm、10~20cm、20~40cm、40~60cm、60~80cm和80~100cm分6层采集。播种前(6月12日)在试验地棋盘式采集8个剖面,以后各期于小区内各取4钻(行间和株间各2钻)分层混合样品。土样采集后装入密封袋中冷冻保存,用于测定硝态氮含量。

成熟期在各小区中部收获4m×3.6m面积玉米植株,测定小区籽粒产量。同时选择相邻5株长势均匀的玉米,70℃烘至恒重测定植株地上部干重,全株粉碎过0.2mm筛测含氮量。

灌溉时每隔10min用100ml聚乙烯瓶收集水样,共计8次。每次降雨时收集8个雨样。冷冻保存,用于测定硝态氮和氨态氮含量。

1.3 测定方法

(1)硝态氮含量测定 土壤样品按1:5比例用1mol L⁻¹ KCl振荡提取1h,过滤后用美国产流动分析仪(FSIV, O. I. Analytical, USA)测定。同时测定土样含水量用于校正土样硝态氮含量。水样直接上机测定。

(2)氨态氮含量测定 水样中氨态氮直接上机测定。

(3)全氮含量测定 土壤和植株样品全氮含量用开氏法进行测定^[7]。

1.4 数据分析

各土层硝态氮量(Y_i)依公式(1)计算:

$$Y_i = T_i \times BD_i / (1 - RWC_i) \times [NO_3^-]_i \times 0.1 \tag{1}$$

式中 T_i 为土层厚度, BD_i 为土层容重, RWC_i 为土层含水量, $[NO_3^-]_i$ 为土层硝态氮含量,0.1为单位换算系数。0~100cm土壤剖面硝态氮量为各土层硝态氮量总和。氮素损失(N_L)依据氮平衡法按公式(2)计算:

$$N_L = TN_S + N_F + N_R + N_I - N_U - TN_H \tag{2}$$

式中, TN_S 和 TN_H 分别为播种前和收获期0~100cm土壤剖面全氮量, N_F 、 N_R 和 N_I 分别为施肥、降水和灌溉时输入的氮素量, N_U 为植株地上部吸收的氮素量。收获指数(HI)为玉米籽粒产量与地上部干物质质量的比列。

2 结果与分析

2.1 施氮量对0~100cm土壤剖面硝态氮动态变化及残留的影响

不施肥条件下(N0)随着玉米生育进程,土壤硝态氮呈现出波状变化趋势(见表1、图1)。从播种到7月21日0~100cm剖面硝态氮逐渐增多,而后迅速降低,8月20日土壤硝态氮量降到玉米全生育期中最低值。而后经过小幅度的增加后,又缓慢降低。与播种前相比,收获期N0处理0~100cm剖面硝态氮量减少了24.0kg N hm⁻²。施肥显著增加了土壤剖面硝态氮总量,并且施氮量与剖面硝态氮总量之间有极显著相关性($R = 0.834^{**}$)。施肥到收获期间,与N0相比,N70、N140和N210处理下剖面硝态氮总量平均分别增加了64.7%、98.4%和124.1%。施氮虽然没有改变土壤硝态氮动态变化趋势,但增大了其变化幅度。7月21日到8月20日,N70、N140和N210处理下剖面硝态氮总量降低幅度分别是N0处理下的1.17、1.44和1.46倍。8月20日到9月9日,N70、N140和N210处理下剖面硝态氮总量升高幅度又分别是N0处理下的1.87、1.48和1.82倍。另外,施用氮肥也显著增加了玉米收获后0~100cm土壤剖面硝态氮残留量,且随施氮量增加硝态氮残留量也呈现出增加趋势。

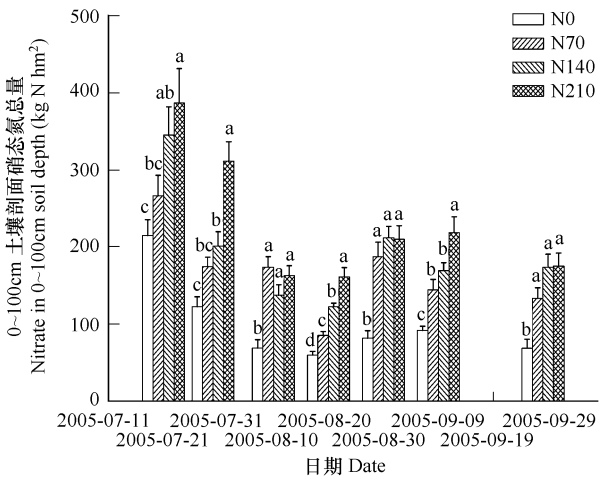


图1 不同施氮量处理下0~100cm土壤剖面土壤硝态氮总量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of total amount of nitrate in 0~100cm soil depth along maize growth proceeding under various nitrogen application rates

2.2 施氮量对各土层硝态氮含量动态变化的影响

如图 2 所示 ,N0 处理下 ,整个玉米生育期间上部土层 (0 ~ 40cm)中硝态氮含量低且稳定。下部土层 (40 ~ 100cm)中硝态氮含量随时间变化明显 ,并且其变化趋势与 N0 处理下 0 ~ 100cm 剖面中硝态氮总量变化趋势相似 ,两者有显著相关性 ($R=0.988^{*}$)。

总体上 ,施肥增加了各土层硝态氮含量。施肥到收获期间 ,与 N0 相比 ,N70、N140 和 N210 处理下各土层硝态氮含量平均增加了 62.2%、103.8% 和 143.1%。并且施肥处理土层中硝态氮含量变化规律也有别于 N0 处理。施肥到 7 月 21 日 ,施肥处理上部土层中硝态氮含量急剧增加。特别是 0 ~ 10cm 土层中 ,土壤硝态氮含量随施氮量极显著增加 ($R=0.887^{**}$)。7 月 21 日 8 月 20 日 ,上部土层硝态氮含量迅速降低。这可能有两方面原因 ,一是该期是试验区的雨季 ,强降水过程就有 3 次 (7 月 24 日 66mm、8 月 8 日 44mm 以及 8 月 16 日 60mm) ,土层中的硝态氮随水向下淋溶 ;二是此期间也是玉米生长旺盛期 ,并且玉米根系主要也只是分布于 0 ~ 40cm 土层中 ,植株从中吸收氮素量增多。此后 20d ,60cm 以下土层中硝态氮含量有一定程度增加 ,这可能是 100cm 以下含硝态氮土壤水的向上迁移造成的。而后 60cm 以下土层中硝态氮含量又缓慢降低。以上变化也说明施用氮肥促进了玉米生育期间土壤硝态氮的淋溶。

表 1 试验点土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of the study site						
土层深度 Depth (cm)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH 值 Soil pH (water)	有机质含量 TOM (%)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	硝态氮含量 ^a NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	硝态氮含量 ^b NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)
0 ~ 10	1.39	8.53	1.71	0.64	3.3	8.6
10 ~ 20	1.33	8.76	1.45	0.64	3.4	4.4
20 ~ 40	1.33	8.84	0.94	0.40	6.0	9.0
40 ~ 60	1.43	9.07	0.74	0.30	9.8	16.4
60 ~ 80	1.46	8.75	0.59	0.30	9.1	16.5
80 ~ 100	1.40	8.61	0.61	0.30	4.7	7.8

a :播种前土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content before seed sowing b :施肥前土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content before applying nitrogen fertilizer

2.3 施氮量对 0 ~ 100cm 土壤剖面硝态氮空间分布动态变化的影响

N0 处理下 ,整个玉米生育期间 0 ~ 100cm 剖面中硝态氮主要分布于下部土层 (见图 2) 。施用氮肥改变了硝态氮在土层中的空间分布状态。刚施肥后 (7 月 21 日)土壤硝态氮主要分布于上部土层。且施氮量越大 ,上部土层硝态氮所占 0 ~ 100cm 剖面硝态氮总量的比例也越大。而后上部土层硝态氮比例急剧下降 ,下部土层硝态氮比例迅速增加。同时在收获期 ,施肥处理下部土层硝态氮比例高于 N0 处理下的比例。

2.4 施氮量对氮损失与玉米产量的影响

如表 2 所示 ,施氮增加了收获后土壤全氮含量 ,同时也显著增加了植株吸氮量。但是 ,施氮明显增加了 0 ~ 100cm 土壤剖面氮素损失 ,并且施氮量越大 ,氮素损失也越大。N210 和 N140 处理下氮素损失量显著高于 N70 和 N0 处理。

表 2 不同施氮量处理下氮素平衡、玉米产量和收获指数

Table 2 Nitrogen balance , grain yield and HI under different nitrogen application rates									
处理 Treatment	TNS (Mg N hm ⁻²)	NF (kg N hm ⁻²)	NR (kg N hm ⁻²)	NI (kg N hm ⁻²)	NU (kg N hm ⁻²)	TNH (Mg N hm ⁻²)	NL (kg N hm ⁻²)	玉米产量 Grain yield (Mg hm ⁻²)	收获指数 HI
N0	5.36 (0.19)	0	6.54 (0.37)	1.80 (0.04)	131.82 (3.95) ^a	5.21 (0.23)	20.9 (7.59) ^a	7.75 (0.08) ^b	0.406 (0.02) ^a
N70	5.36 (0.19)	70	6.54 (0.37)	1.80 (0.04)	134.74 (2.98) ^a	5.27 (0.26)	29.8 (9.71) ^a	8.19 (0.13) ^a	0.407 (0.01) ^a
N140	5.36 (0.19)	140	6.54 (0.37)	1.80 (0.04)	148.78 (0.79) ^b	5.30 (0.11)	57.0 (6.34) ^b	7.73 (0.18) ^b	0.331 (0.01) ^b
N210	5.36 (0.19)	210	6.54 (0.37)	1.80 (0.04)	162.57 (1.65) ^a	5.31 (0.17)	102.7 (21.22) ^a	7.21 (0.10) ^c	0.329 (0.00) ^b

括号中为标准误 ,同指标数据后标识不同字母表示差异显著 ;TNS ,NF ,NR 和 NI 4 指标 $n=8$,其余指标 $n=4$ Standard errors of mean are in parentheses ; Means followed by different letters of same parameter were significantly at $p<0.05$; $n=8$ for TNS ,NF ,NR , and NI ; $n=4$ for others

施氮量对玉米籽粒产量有显著影响。N70 处理下玉米产量最高 ,不施肥以及施氮量过多都造成玉米减

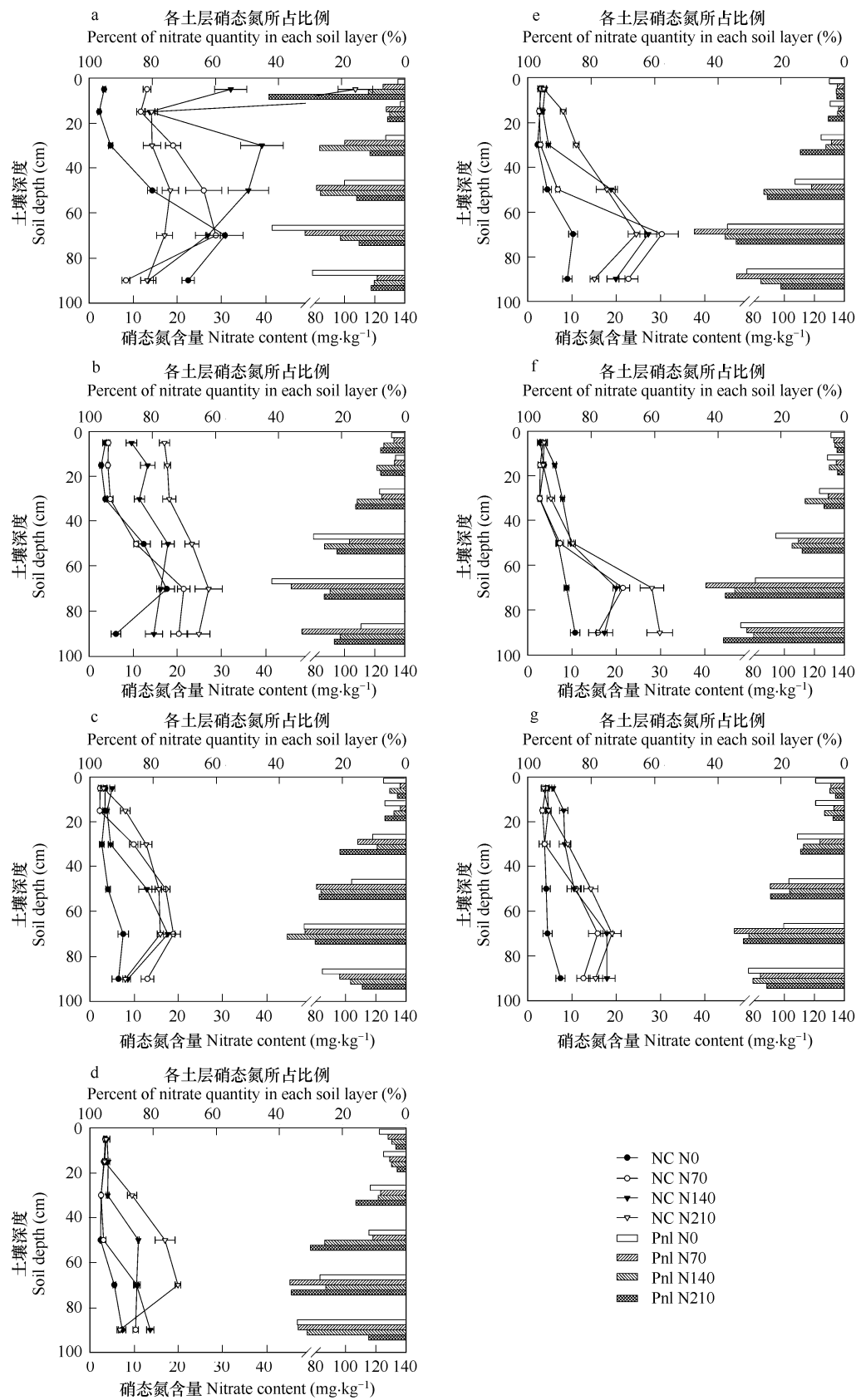


图2 不同施氮量处理下各土层硝态氮含量及分布比例的动态变化

Fig.2 Dynamic of nitrate content (NC) and percent of nitrate quantity in each soil layer (Pnl) under various nitrogen application rates
从 a 到 g 分别对应采样日期从 7 月 21 日到 9 月 28 日 $n=4$ a 到 g represented the sampling date from 21 July to 28 September respectively. $n=4$

产。N0 处理下玉米地上部干物质量显著低于其它处理 ,N140 处理下玉米收获指数显著低于 N70 ,而 N210 处理造成玉米减产的原因则同时包括这两个方面。

3 结论与讨论

3.1 玉米产量

本研究表明施氮量对玉米产量有显著影响 ,这与 Hogg^[8]、Abad 等^[9]的研究结果相同。但也有研究表明作物产量与施氮量水平关系甚微^[6,20]。这种分歧可能是各研究试验点土壤剖面初始硝态氮总量不同造成的。在本试验中 0~100cm 剖面初始硝态氮总量为 92.93 kg N hm⁻²。据 Abad 等报道 ,初始硝态氮总量低于 157 kg N hm⁻²的情况下 ,作物产量会在施氮量小于 100 kg N hm⁻²的范围内随施氮量增加而升高 ,而更高的初始硝态氮总量会降低产量对施氮量的响应程度^[9]。

3.2 硝态氮动态

本研究表明 ,无论施肥与否 0~100cm 土壤剖面硝态氮随玉米生育进程呈现出波状变化趋势 ,这与吴永成等研究的“斜 N 型”变化规律不同^[21]。可能与试验点立地条件不同以及后者采样次数少有关。在玉米生育前期 (7 月 21 日前) ,即使不施肥 ,土壤剖面硝态氮总量也呈增加趋势 ,这和 Wild^[22]和 Weber^[23]的结论是相同的。因为在玉米生育前期 ,植株吸收氮素量较少。同时 ,土壤氮素的矿化与土壤温湿度密切相关 ,季风气候区夏季温暖湿润的环境也有利于土壤氮素的矿化^[24]。而后土壤硝态氮的动态变化则主要受玉米吸氮、降水和土壤水运移综合作用的影响。

3.3 氮素损失与硝态氮残留

用氮平衡方法计算得出的氮损失量包括了氮淋溶、氮挥发和反硝化等方面的氮素损失。由于 99% 玉米根系分布于 100cm 土体以内^[21] ,很难利用下层的氮素 ,所以过量地施用氮肥必将对环境安全构成威胁。Murwira 和 Kirchmann 研究发现成熟期玉米根系所含氮素量是出苗后 70d 地上部所含氮素量的 8%~12%^[25] ,考虑这部分氮素则剖面氮素损失量会有所降低。

施用氮肥显著增加了 0~100cm 土壤剖面硝态氮残留 ,这与前人研究结果相一致^[19,20]。Hofman 研究表明在作物收获后 ,符合环境安全的 0~100cm 土壤剖面硝态氮残留量上限为 90~100 kg N hm⁻²^[26]。本试验中各施肥处理下玉米收获后 0~100cm 剖面硝态氮残留量均超过该标准 ,将不利于环境保护。综合考虑施氮量对玉米产量、硝态氮残留及氮素损失的影响 ,该区玉米生长季氮肥施用量应低于 70 kg N hm⁻² ,但是长期下去是否会导致土壤肥力下降还需要进一步研究。

References :

[1] Hignett T P , ed. Fertilizer Manual. Developments in Plant and Soil Sciences , Vol. 15. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers , Dordrecht ,1985.

[2] Fried J J. Nitrates and their control in the EEC aquatic environment. In : Bogardi I , Kuzelka R D , eds. Nitrate contamination : Exposure , Consequence , and Control , NATO ASI Serial G : Ecological Sciences 309. Springer , Berlin ,1991. 3—8.

[3] Rivers C N , Hiscock K M , Feast N A , *et al.* Use of nitrogen isotopes to identify nitrogen contamination of the Sherwood sandstone aquifer beneath the City of Nottingham. UK. Hydrol. J. ,1996 ,4 (1) :90—102.

[4] Oenema O , Boers P C M , Willems W J. Leaching of nitrate from agriculture to groundwater : the effect of policies and measures in the Netherlands. Environ. Pollut. ,1998 ,102 :471—478.

[5] Sánchez-Pérez J M , Antiguiedad I , Arrate I , *et al.* The influence of nitrate leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country : a case study. Sci. Total Environ. ,2003 ,317 :173—187.

[6] Basso B , Ritchie J T. Impact of compost , manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. Agric. Ecosyst. Environ. ,2005 ,108 :329—341.

[7] Pacheco J , Cabrera S. Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula , Mexico. Hydrol. J. ,1997 ,5 (2) :47—53.

[8] Satorre E H , Slafer G A. Wheat production systems of the Pampas. In : Satorre E H , Slafer G A , eds. Wheat , Ecology and Physiology of Yield Determination. New York : Food Products Press ,1999. 333—348.

[9] Zhu J G. , Liu G. , Han Y. , *et al.* Nitrate distribution and denitrification in the saturated zone of paddy field under rice/wheat rotation.

Chemosphere ,2003 ,50 :725 — 732.

[10] Schepers J S , Varvel G E , Watts D G. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. J. Contam. Hydrol. ,1995 ,20 :227 — 239.

[11] Diez J A , Roman R , Caballero R , *et al.* Nitrate leaching from soils under a maize-wheat-maize sequence ,two irrigation schedules and three types of fertilisers. Agric. Ecosyst. Environ. ,1997 ,65 :189 — 199.

[12] Rajput T B S , Patel N. Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments. Agric. Water Manage. , 2006 ,79 (3) :293 — 311.

[13] Schmidtke K , Neumann A , Hof C , *et al.* Soil and atmospheric nitrogen uptake by lentil (*Lens culinaris* Medik.) and barley (*Hordeum vulgare* ssp. Nudum L.) as monocrops and intercrops. Field Crops Res. ,2004 ,87 :245 — 256.

[14] Ju X T , Kou C L , Zhang F S , *et al.* Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination : Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. Environ. Pollut. ,2006 ,143 (1) :117 — 125.

[15] Wan B L , Xiao J Q. Rational controlling and utilizing water resources and developing water saving irrigation for agriculture. Ground Water ,2005 , 27 (2) :81 — 83.

[16] Mao R Z , Fitzpatrick R W , Liu X J , *et al.* Chemical properties of selected soils from the North China Plain. In : Mcvcar T R , Li R , Walker J , *et al* , eds. Regional water and soil assessment for managing sustainable agriculture in China and Australia. Australian Centre for International Agricultural Research , Canberra ,2002. 173 — 186.

[17] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition). Beijing :Chinese Agriculture Press ,2000. 42 — 49 ,264 — 268.

[18] Hogg T J , Acherman P. Late nitrogen application to improve grain protein of irrigated Sceptre durum wheat. In : Fowler D B , Geddes W E , Johnston A M , *et al* , eds. Proceedings of the wheat protein symposium on production and marketing. University of Saskatchewan , Saskatoon , 1998. 291 — 297.

[19] Abad A , Lloveras J , Michelena A. Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions. Field Crops Res. ,2004 ,87 :257 — 269.

[20] Li W X , Li L , Sun J H , *et al.* Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. Agric. Ecosyst. Environ. ,2005 ,105 :483 — 491.

[21] Wu Y C , Zhou S L , Wang Z M , *et al.* Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China. Acta Ecologica Sinica ,2005 , 25 (7) :1620 — 1625.

[22] Wild A. Mineralization of soil N at a Samaru site in Nigeria. Exp. Agric. ,1972 ,8 :91 — 97.

[23] Weber G , Chude V , Pleysier J , *et al.* On-farm evaluation of nitrate-N dynamics under maize in the northern Guinea savanna of Nigeria. Exp. Agric. ,1995 ,31 :333 — 344.

[24] Adhikari C , Bronson K F , Panuallah G M , *et al.* On-farm soil N supply and N nutrition in the rice-wheat system of Nepal and Bangladesh. Field Crops Res. ,1999 ,64 (3) :273 — 286.

[25] Murwira H K , Kirchmann H. Nitrogen dynamics and maize growth in a Zimbabwean sandy soil under nitrogen fertilization. Commun. Soil Sci. Plant Anal. ,1993 ,24 :2343 — 2359.

[26] Hofman G. EU concerted action : nutrient management legislation in European countries. NUMALEC Report , Fair 6-CT98-4215. ,1999. www. uni-hohenheim. de/i3v/

参考文献：

[15] 万宝林 ,肖俊青. 水资源合理调控利用 发展农业节水灌溉. 地下水 ,2005 27 (2) 81 ~ 83.

[17] 鲍士旦 (主编). 土壤农化分析 (第 3 版). 北京 :中国农业出版社 ,2000 42 ~ 49 ,264 ~ 268.

[21] 吴永成 ,周顺利 ,王志敏 ,等. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留. 生态学报 ,2005 25 (7) 1620 ~ 1625.